

© В.І. Бондаренко¹, І.А. Ковалевська¹, Д.С. Малашкевич¹, В.В. Сушкова¹
¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

© V. Bondarenko¹, I. Kovalevska¹, D. Malashkevych¹, V. Sushkova¹
¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN ENERGY

Мета. Аналіз проблем і перспектив розвитку способів видобування водню, огляд літератури та вивчення методів його транспортування та використання водневого палива в Україні та світі.

Методика. Для досягнення поставленої мети у роботі використано емпіричний метод наукового дослідження з урахуванням теоретичних положень.

Результати. Розширені та систематизовані методи отримання водню різними технологіями (такими як видобування зеленого водню з надлишкової електроенергії відновлюваних джерел, газифікація коксівного вугілля при високій температурі, електроліз), що дозволило створити лабораторну установку, початковим матеріалом якого є дистилат з шахтної води, для отримання водню методом електролізу.

Наукова новизна полягає в аналізі та систематизуванні енергетичних та екологічних аспектів використання водневого палива на основі загальних відомостей про водневу енергетику в Україні та світі. Встановлені закономірності впливу різних способів отримання водню на навколишнє середовище. Хоча водень вважається екологічно чистим, в майбутньому необхідно розглянути таку проблему, як посилення глобального парникового ефекту в результаті антропогенної діяльності при масовому виробництві та застосуванні водню і вплив цієї діяльності на захист озонового шару Землі.

Практична значимість. Підтверджено доцільність переходу до водневої енергетики з отриманням зеленого водню способом електролізу. Україна має високий потенціал у сфері видобування екологічно чистого зеленого водню інноваційними технологіями. Перевагою молекулярного водню як синтетичного палива є висока енергоємність, де водень перевищує природний газ у 2,6 рази, нафту у 3,3 рази та целюлозу у 8,3 рази. Актуальне питання щодо використання вітрової, сонячної та інших видів енергії призвело до зростання частки альтернативних джерел у період з 2007 р. по 2020 р. Універсальним інструментом декарбонізації є потенціал виробництва і використання «зеленого водню». Водень продукують з використанням електроенергії, яка видобувається з поновлюваних джерел, який зараз складає близько 1% від загального його виробництва.

Ключові слова: видобування водню, декарбонізація, енергетика, відновлювані джерела енергії, електроліз, зелений водень.

Вступ. У сучасному світі, зокрема в Україні, розглядається важливе питання щодо впровадження такого енергоносія як водень. Воднева енергетика у майбутньому може бути альтернативою багатьом викопним паливам, таким як нафта

і вугілля. На сьогодні перехід на водень є актуальним рішенням з ухилом на екологічність та декарбонізацію енергетичного сектору. Його можна отримувати найрізноманітнішими способами з природних ресурсів, а саме з вугілля, газу, біопалива, органічних відходів та сільськогосподарських відходів.

У майбутньому воднева енергетика буде свідчити у світових масштабах про те, що водень може бути екологічно чистішим джерелом для кінцевих споживачів, особливо у транспортній галузі, в місці кінцевого використання викидів забруднюючих речовин та твердих часток або діоксиду вуглецю не буде.

Наразі відомо, що у 2019-2020 рр. Європейська Комісія представила три стратегічних документа, у яких визначено суттєве підвищення ефективності використання ресурсів, зменшення викидів і скорочення забруднення, які охоплюють такі сектори економіки, як енергетика, промисловість, будівництво тощо:

1. Європейський зелений курс бере за мету перетворення Європи до 2050 року на перший кліматично нейтральний континент.
2. Стратегія ЄС з інтеграції енергетичної системи буде напружена на підвищення енергоефективності євросоюзної економіки за рахунок створення інтегральної системи енергозабезпечення.
3. Воднева стратегія ЄС передбачає поширене використання водню як енергоносія для тих галузей, які не можна електрифікувати і метою є звести на нуль викиди вуглекислого газу промисловістю, транспортом та енергетикою.

Тому, воднева енергетика розглядає водень як енергоносію, який можна накопичувати. Використання водню як палива позитивно вплине на енергетичну безпеку, екологію та економічне зростання [1].

I. Енергетичні та екологічні аспекти використанні водневого палива.

Перспектива стратегічного вибору України буде саме перехід до чистої енергетики, яка визначить головні тренди та напрямки розвитку національної економіки протягом наступних 30 років

Відомо про водень такі властивості: це газ, який складно зберігати, безбарвний, не має запаху, малорозчинний у воді, найбільш легкий серед усіх газів, типовий неметал. При підпалюванні він реагує з киснем і горить світло-блакитним, майже непомітним полум'ям. Станеться вибух, якщо до отвору пробірки з сумішшю водню та повітря піднести полум'я. Вагомим недоліком для використання водню в Україні є застаріла та не узгоджена база нормативно-правових актів та документації з технічної безпеки, а також незнання суб'єктів господарювання в цій сфері.

На сьогодні сектор електроенергетики та транспортний сектор України задовольняють свої енергетичні потреби за допомогою традиційних видів палива: вугілля, нафта, газ та нафтопродукти і при цьому значна частина цих продуктів імпортується. Варто відмітити, що приблизно 50% займає атомна енергія [2]. Один з найперспективніших способів диверсифікації джерел виробництва носія енергії є збільшення частки носіїв енергії, отриманих з допомогою використання відновлюваних джерел у структурі паливно-енергетичного балансу країни.

Енергетична стратегія України передбачає збільшення частки «зеленої енергії» до 2035 року майже на 25%, також країна стрімко намагається зменшити залежність енергетичного імпорту хоча б до 33% до 2035 року. Цілі України як

сторони, що підписала Паризьку кліматичну угоду, включають зменшення викидів CO₂ на 40% до 2030 року [3].

Такому сектору, як електроенергетика України, потрібно і важливо розпочати новий етап з новими технологіями, аби позбутися від застарілих та зношених виробничих об'єктів, залежності від імпорту палива. Також основною проблемою залишається недостатня гнучкість енергетичної системи та непригодні умови навколишнього середовища.

Ключовим напрямом розвитку енергетичного сектору України є забезпечення відтворення відновлюваних ресурсів, наприклад водню, зниження навантаження та асиміляційного потенціалу навколишнього середовища.

Перевагами молекулярного водню як синтетичного виду палива є:

1. Висока енергоємність (водень перевищує за енергоємністю природний газ у 2,6 рази, нафту у 3,3 рази, целюлозу у 8,3 рази).
2. Основним продуктом його окиснення є вода.
3. Практично невичерпні запаси дешевої сировини – води, яка містить більше 10% водню.
4. Можливість використання паливних елементів атомної енергетики [2].

Потрібно враховувати повний процес виробництва водню, тому що він може спричинити невелику кількість викидів вуглекислого газу. Тому електрика, яка використовується при виробництві водню, має бути вироблена екологічно чистими джерелами енергії. Єдиним недоліком для практичного використання водню як синтетичного палива є висока ціна.

Тому воднева енергетика вважається екологічно чистою і необхідно розглянути існуючу проблему, таку як посилення глобального парникового ефекту в результаті антропогенної діяльності при виробництві та застосуванні водню, а також вплив цієї діяльності на захисний озоновий шар Землі.

Висновком є те, що водень на Землі переважно знаходиться у зв'язному стані і це створює певні технологічні труднощі та обумовлює значні енергетичні затрати при його виробництві.

Перевага надається електролізу води і надії при цьому в більшій мірі на атомну електроенергетику. Україна хоче зробити інноваційний внесок у розвиток водневої енергетики та знайти нові, більш оптимальні способи видобутку водню, як нового виду палива [4].

II. Від реформ в енергетичному секторі багато в чому залежить зростання вітчизняної економіки.

Попит на енергоресурси сьогодні та у майбутньому визначатиметься, по-перше, зростанням кількості населення, зокрема, в країнах, що швидко розвиваються (Індія, Китай), по-друге – боротьбою зі зміною клімату, де каталізатором є курс на декарбонізацію, по-третє – ціноутворенням на енергоресурси.

Найбільший попит на сьогодні займає природний газ, оскільки саме він є більш екологічно чистим, аніж вугілля чи нафта, і саме він спричиняє мінімальний викид CO₂ та відповідає цілям декарбонізації.

Декарбонізація для енергетичного сектору є поступовою відмовою від викопних видів палива на користь відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Безперечним є той факт, що з кожним роком видобуток нетрадиційних видів палива сприяє збільшенню конкуренції на ринках традиційних видів палив. І при цьому собівартість ВДЕ стрімкими темпами буде наближуватись до рівня собівартості традиційних видів палива (рис. 1) [5].

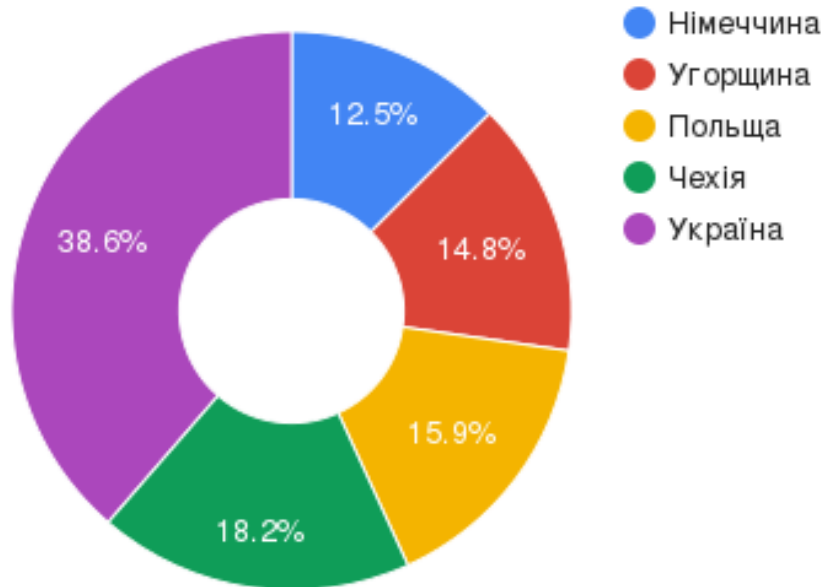


Рис. 1. Рівень енергоемності ВВП за паритетом купівельної спроможності

Більшість європейських країн вирішують проблему споживання енергоносіїв шляхом покращення технологічного процесу, зменшуючи енергоемність виробництві та підвищуючи рівень енергозбереження у промисловості. У цей час багато країн світу розповсюджує явище використання вітрової енергії, але це недостатньо ефективно, у зв'язку з нестабільністю отримання необхідної кількості енергії, вітрогенератори значно поступаються у виробленні електроенергії дизельним генераторам, вартість установки потужністю 1МВт становить близько 1 млн доларів, небезпечно для дикої природи та ін. [6].

Енергоефективна політика країн Європи доводить свою результативність, яка підтверджується рівнем енергоемності ВВП за ПКС (паритетом купівельної спроможності).

На сьогодні відомо і про обмежені запаси корисних копалин. Особливо турбує на сьогодні той факт, що уже в недалекому майбутньому зникне такий вид палива як нафта. За різними даними, її може хватити ще на роки 50-100. Тому саме зараз розвиток не стоїть на місці, і кожен вчений намагається знайти альтернативу саме цьому паливу. І завдяки цій проблемі у світі багато чого змінюється, наприклад розробляють електричні двигуни, а також мотори, що працюють на водні.

Споживання енергії в світі особливо швидко зростало в 2010-2015 роках. У цей період енергетика розвивалась швидкими темпами. Протягом ХХ століття змінилася структура паливно-енергетичного балансу світового господарства. Якщо в першій половині ХХ століття в енергобалансі світового господарства

мало важливе значення вугілля і дрова, то в останні десятиліття цю роль відіграють нафта і газ (рис. 2) [7].



Рис. 2. Світове споживання енергії

Вугільна промисловість – найстаріша серед паливних галузей. Її величезні запаси вугілля покривають майже 1/3 потреб світу в енергоносіях.

Рівень розвитку електроенергетики є найважливішим показником НТП. Будівництво ТЕС порівняно дешевше, але несприятливо, в плані екологічності, впливає на навколишнє середовище.

В енергетичному балансі країни за 2007 та 2020 роки значно помітно зміни у обсягах постачання первинної енергії (рис. 3) [3].

Енергетичне споживання енергії в Україні

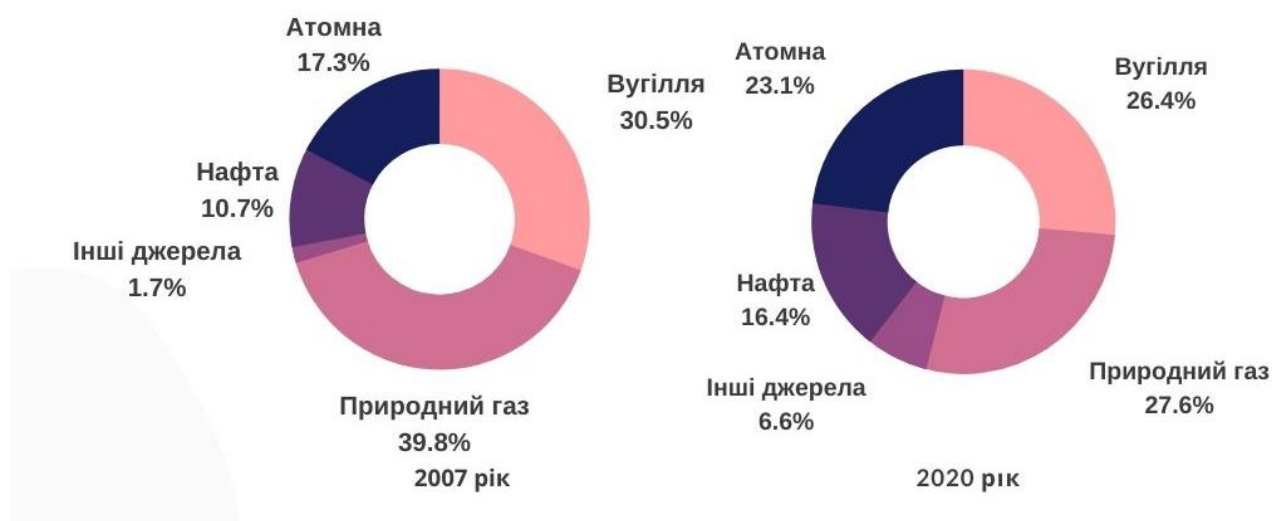


Рис. 3. Структура загального постачання первинної енергії за 2007 та 2020 роки

З рис. 3 видно, як змінився обсяг енергії в період з 2007 по 2020 рік. Зросла частка альтернативних джерел, тому що на сьогодні це є актуальним питанням, щодо використання сонячної, вітрової та інших видів енергії. За рахунок цього знизилась частка використання природного газу із-за встановлення багатьма людьми вдома сонячних панелей або вітряків. Використання вугілля також зменшилось, але нафта та атомна енергетика йде на збільшення.

III. Екологічна складова і забруднення навколишнього середовища CO₂

Вуглекислий газ є основним забруднювачем атмосфери. ТЕС значно впливають на глобальне потепління, оскільки вони виробляють електроенергію з органічного палива і відповідно виділяють значну кількість CO₂ в атмосферу.

Питання щодо економії енергоресурсів чи ефективності виробництва раніше відходили на другий план, тому що більшість великих промислових підприємств України були збудовані ще за радянських часів. Епоха дешевих енергоносіїв завершилась в той момент, коли впровадили ринкові ціни на електроенергію та газ, але більша частина підприємств і по сьогодні споживає такі ж обсяги енергії, як і раніше. Через це важка промисловість – є лідером з викидів CO₂.

В останні десятиліття глобальне потепління є важливим питанням перед економікою світу. Головним драйвером у зменшенні впливу промисловості на природу став ЄС, який стимулює інші розвинені країни проваджувати інструменти та технології для більш екологічно чистої промисловості.

У 2019 році в ЄС затвердили нову масштабну програму European Green Deal щодо трансформації економіки до 2050 року, яка передбачає повну відмову від використання викопних видів палива. Україна тісно співпрацює з країнами ЄС у багатьох галузях і саме тому активно підтримує усі екологічні ініціативи. ЄС бачить Україну, як одного із стратегічних партнерів у виробництві водню, і саме наша країна може стати повноцінною заміною природного газу [6].

Для створення одиниці товару українська промисловість витрачає велику кількість енергоресурсів, саме тому створює більше викидів вуглецю та шкідливих речовин. Особливо зважаючи на значну частку вугільної генерації в енергобалансі країни (майже 40%) [7]. За результатами дослідження британського аналітичного центру Carbon Tracker, проведеного у 2018 році, Україна очолила список країн з найбільш неефективною і дорогою тепловою генерацією електроенергії у світі.

Важка промисловість країни стоїть перед жорсткою умовою: платити високі податки за викиди вуглецю або модернізувати виробництво. Щоб захистити інвестиції, які будуть виділяти для процесу декарбонізації, у ЄС задекларували намір запровадити податок на імпорт товарів з вуглецевим слідом. Найбільше може постраждати металургія та хімічна промисловість.

Українські виробники ризикують втратити доступ до ринку, де проживає близько 400 млн населення з високою платоспроможністю.

«Інтерпайп сталь» – єдиний в Україні металургійний завод, збудований з нуля за роки незалежності. У 2012 році тут закрили мартенівські цехи для виплавки металу і запустили процес виплавки сталі за допомогою електроенергії. Це

дозволило зменшити споживання газу у 8 разів. Закриття брудного виробництва дозволило зменшити викиди CO₂ у десять разів [8].

Шляхом до енергонезалежності України має бути декарбонізація економіки та розвиток «зеленої» енергетики. Щоб сприяти розвитку біоенергетики розроблено низку законопроектів, які передбачають:

- створення ринку твердого біопалива;
- встановлення нульової ставки податку на викиди CO₂ при спалюванні біомаси;
- запровадження ринку виробництва та використання рідкого біопалива;
- розвиток сфери виробництва біометану.

Потенціал виробництва та використання “зеленого” водню вже дослідили Міненерго та міжнародні партнери, які визнали його як універсальний інструмент декарбонізації.

Україна є частиною великої глобальної боротьби зі зміною клімату. Кіотський протокол та Паризька угода – в реалізації цих стратегічних документів ми приймаємо безпосередню участь.

У **Кіотському протоколі** йдеться мова про обмеження викидів в атмосферу парникових газів. Головною метою угоди є стабілізація рівня концентрації парникових газів в атмосфері на рівні, який не допускав би небезпечного антропогенного впливу на клімат.

Протокол зобов'язує розвинуті країни та країни з перехідною економікою скоротити або стабілізувати викиди парникових газів у 2008–2012 роках до рівня 1990 року [9].

Раціональне використання енергоресурсів та зменшення обсягів виробництва можуть зменшити викиди парникових газів. Кіотським протоколом передбачаються гнучкі механізми щодо зменшення викидів шляхом закупівлі відповідних сертифікатів за кордоном:

1. Механізм чистого розвитку — передбачає співпрацю між країною, яка розвивається, та індустріалізованою країною;
2. Торгівля викидами — передбачає прямий продаж викидів від однієї індустріалізованої країни до іншої;
3. Спільне впровадження — передбачає співпрацю між двома індустріалізованими країнами.

ЄС роблять ставку на внутрішню торгівлю сертифікатами викидів для регулювання викидів парникових газів. Починаючи з 2005 року, кожне європейське промислове підприємство, яке відповідає вимогам Схеми Торгівлі Викидами (EU ETS), отримує певну кількість таких сертифікатів. Якщо деякі підприємства в стані зменшувати шкідливі викиди, то вони зможуть продавати залишкові сертифікати іншим фірмам. Аналогічно, невикористані внаслідок зниження виробництва сертифікати, можуть бути продані. Таким чином, ініціюється національний, а згодом, і європейський ринок сертифікатів, який з точки зору економічної теорії є одним із найкращих методів регулювання ринку [9].

Підставою для налагодження міжнародної співпраці у сфері скорочення викидів CO₂ є можливість купівлі країнами одиниць викидів CO₂ в інших державах.

Паризька угода розглядається як угода Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 р. Паризька хартія має замінити Кіотський протокол. Текст угоди було погоджено на 21-й Конференції учасників UNFCCC в Парижі та прийнято консенсусом 12 грудня 2015 р. [9].

Метою угоди було «підсилення впровадження» Рамкової конвенції про зміну клімату шляхом:

1) утримання зростання середньої світової температури на рівні значно нижче $+2^{\circ}\text{C}$ від доіндустріальних рівнів та спрямовувати зусилля на обмеження зростання температури до $+1,5^{\circ}\text{C}$ від доіндустріальних рівнів, оскільки це значно зменшить ризики зміни клімату та впливи на них;

2) збільшення здатності адаптуватися до негативних змін клімату, розвиток з низькими викидами парникових газів у спосіб, що не загрожує виробництву харчів;

3) гармонізація фінансових потоків зі шляхом розвитку з протидіями змінам клімату та з низькими викидами парникових газів» [9].

Відомо, що викиди парникових газів надовго затримуються в атмосфері, а зростання та розвиток добробуту бідних країн приведе їх до збільшення викидів газів. Існує кумулятивний ефект, де на піку поворотної точки вплив накопичення парникових газів буде мати більш негативний характер.

IV. Альтернативні джерела енергії в світі та в Україні.

Що таке альтернативна енергетика

Досі не існує сталого поняття терміну “альтернативна енергетика”. Деякі вважають, що це джерела, які не несуть шкоду навколишньому середовищу. Але враховуючи думку деяких експертів, що гідроелектростанції, ядерні об’єкти та навіть вугілля також можна віднести у цю групу. Все тому, що викиди CO_2 є мінімальними і вони не залишають значного сліду.

Існуючі на сьогодні джерела енергії поділяють на традиційні та альтернативні. До традиційних відносять корисні копалини – нафту, газ та вугілля. Їх найбільший недолік – вони невідновлювані. Це є першим фактором для необхідності використання інших енергоносіїв. Другим фактором є екологія планети. Викиди парникових газів порушують кліматичний баланс. Єдиним доступним людям спосіб знизити темпи зміни клімату – це перехід на більше екологічно чисті джерела.

Наступне питання полягає в безпеці для людства, тваринного світу та природи. З кожним роком споживачам необхідна більша кількість електроенергії, тим самим підвищується рівень забруднення водойм, повітря, утворюються нові озонові діри. Все це є наслідком, здебільшого, теплових електростанцій. 50% світової електроенергії припадає саме на ТЕС. [5] Вони надзвичайно забруднюють водойми, що служать для них охолоджувачами, а також створюють токсичне і радіаційне забруднення.

Саме тому такої популярності набувають поновлювані енергетичні та теплові джерела. Станом на 2021 рік в Україні 9% електроенергії виробляється за допомогою альтернативних джерел (рис. 4).



Рис. 4. Споживання енергії в Україні у 2021 р.

Сонячна енергетика.

Для електричної енергії або теплової, що нагріває рідину, використовують сонячні електростанції та колектори, які користуються енергією світлового потоку. На фотоелементи вона потрапляє природним шляхом. Переваги – екологічність і відсутність шкідливих викидів, недолік – нерівномірність одержуваної потужності протягом деяких часових періодів.

• Сонячна електростанція.

Передовим у автономній сонячній енергетиці став 2020 рік. Сонячні станції залишаються лідерами серед альтернативних джерел енергії для дому. Все це із-за того, що цей вид енергії стає доступнішим і швидко розвивається.

Перешкодою на шляху до енергонезалежності за допомогою сонця є проблема з акумулюванням виробленої електроенергії. Гелеві, мультигелеві чи карбонові акумулятори служать від 1 до 3 років, тоді доводиться їх змінювати. Це не малі кошти, тому простіше та економніше використовувати загальну електромережу. Та компанія Pylon Technologies довела, що акумуляторні батареї можуть жити довго.

Варто відмітити, що це більш доступна альтернатива не лише для малих домогосподарств, тому виробничі підприємства почали підвищувати рентабельність продукції, шляхом встановлення автономних СЕС. Сучасні автономні системи дозволяють зафіксувати тариф масштабних об'єктів у 50 копійок за 1 кВт [3].

Вітрова енергетика.

Цей вид альтернативного джерела використовується здавна, прикладом чого є вітряки. Це один з найбільш дешевих видів альтернативної енергетики. Його великим недоліком є наявність шуму, виробленого вітровою установкою [10].

• Вітрогенератор

Якщо в домі немає електромережі або постійні перебої – вітряк це хороше вирішення проблеми. Але коли з електрикою все в порядку, така інвестиція не буде рентабельною.

Якщо ви плануєте встановити вітрогенератор, необхідно врахувати деякі показники: для початку середньорічна швидкість вітру повинна становити більше ніж 4–4,5 м/с (14,4—16,2 км/год) [5]. Варто пам'ятати про те, що поряд не має бути високих дерев чи будівель для уникнення вітрової тіні. В іншому випадку потрібно піднімати конструкцію на більшу висоту, а це додаткові витрати.

Гідроенергетика.

Таке альтернативне джерело як рухомий водяний потік використовується в декількох видах генераторів. Перевагою є екологічність, а недоліками є те, що вартість обладнання висока і можливі місця установки обмежені.

Біопаливо.

Біопаливо у промисловому виробництві використовують як відходи сільськогосподарського виробництва і вирощувані культури. Перевагою є дешевина одержуваного продукту, а недоліком вважають тривалий термін відновлення і вирощування вихідної сировини.

Безперечним лідером серед альтернативних джерел в Україні є сонячна енергетика. Якщо станом на кінець 2019 року загальна потужність ВДЕ становить 3634,4 МВт, то 72,65% - СЕС, а це 2640,4 МВт. Друге місце зі значним відривом посідають вітрові установки - 21,37% (776,6 МВт), далі біомаса та біогаз - 3,24% (117,7 МВт). Найменш популярними є малі гідроелектростанції, їх частка становить 2,75% (99,8 МВт) [3].

Енергонезалежність, до якої прагне Україна, полягає не тільки у раціональному споживанні енергії, але й у розвитку енергетики в цілому. Сьогодні цей розвиток - інвестиції у відновлювану енергетику. Тим паче, що побудувати СЕС дешевше, ніж вугільні ТЕС чи ТЕЦ. Тому збільшення частки енергії з відновлюваних джерел на сьогодні є одним із пріоритетних напрямів розвитку енергетики. Запровадження стандартів сталого розвитку — це дієва інвестиція не тільки в імідж компаній, а й реальний спосіб підвищити його вартість чи залучити фінансування.

V. Воднева енергетика, загальні відомості.

Для України водень є перспективним паливом, яке за умов жорсткого дотримання вимог техніки безпеки може замінити вуглеводневі джерела енергії та зменшити рівень енергетичної залежності країни. Основними завданнями із яких є:

- забезпечення достатньої високої ефективності виробництва;
- транспортування та зберігання водню;
- розробка конкурентоспроможності енергоустановок з його використання.

Останні три роки багато країн заявляє про прийняття національних водневих стратегій. Як розповідають науковці, на планеті водень (H_2) у вільному стані майже не існує, тому він і не є прямим джерелом енергії, а лише може виступати енергоносієм. На відміну від електрики, водень є джерелом хімічної енергії і саме тому, водень, який виробляється з ВДЕ, називають «зеленим», «чистим» або відновлюваним воднем.

Основні галузі промисловості, що потребують значних об'ємів H_2 – нафтопереробка, виробництво аміаку, метанолу і сталі. На сьогодні водень виробля-

ється з використанням викопного палива, тому Міжнародне енергетичне агентство наголошує на потенціал скорочення викидів за рахунок переходу на «чистий» водень.

Водень – найрозповсюдженіший елемент у світі. Він міститься у воді, вуглеводнях та інших органічних сполуках. Більшість водню на сьогодні отримується з природного газу на тих підприємствах, для яких це є економічно доцільним. Перелік основних характеристик водню виглядає так:

- безбарвний газ;
- не має запаху;
- малорозчинний у воді;
- найбільш легкий серед усіх газів;
- має високу щільність енергії за вагою, але низьку щільність за об'ємом у порівнянні з дизельним паливом чи метаном.

На сьогоднішній час 6% природного газу і 2% вугілля спрямовується саме на виробництво водню. Більше половини водню у світі використовується для синтезу аміаку, який потім використовується як добриво, чверть – на нафтопереробних заводах для перетворення важкої нафтової сировини у легші фракції, і ще близько 10% – для виробництва метанолу [10].

Сам по собі водень прозорий, але у промисловості має класифікацію “кольорових” позначень. Вплив його на клімат залежить від його способу виробництва.

Зелений водень є кліматично нейтральним, як зазначила кліматична спільнота.

Сірий водень отримується з використанням викопного палива, зазвичай це енергетичне спалювання природного газу.

Коричневий водень виробляється у меншій кількості з нафти та вугілля.

Блакитний водень генерується з використанням невідновлюваних джерел енергії, це може бути природний газ. Він декарбонізується за технологією вловлювання, використання і зберігання вуглецю під час парового риформінгу метану.

Бірюзовий водень один з нових видів, який виробляється за допомогою розщеплення метану на водень і твердий вуглець при допомозі піролізу.

Електролізерами виробляється рожевий (або жовтий) водень, які живляться електрикою з АЕС. Це виробництво дуже ризиковане і екологічно несприятливе, за рахунок діяльності атомної енергетики.

Зелений водень відповідає рівню з низьким вмістом вуглецю, він генерується за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як вітер або сонце. Це вважається найкращим кліматичним рішенням (табл.) [6].

З використанням зеленого водню не все так просто, так як при електролізі виробництва великої кількості водню треба багато води найкращої якості, електроенергія та електролізери. Так як електроенергія надходить з відновлюваних джерел, то для створення виробничої інфраструктури потрібні викиди вуглецю.

Класифікація водню за кольором та способом видобування

Колір	Виробляється з ...
Зелений	електоенергії з відновлюваних джерел енергії через електроліз води
Блакитний	Викопних вуглеводнів із застосуванням технології уловлювання та зберігання вуглецю
Сірий	Викопній углеводнів (газу, нафти)
Коричневий/чорний	вугілля
Бірюзовий	Розщеплення метану
Фіолетовий	Електроенергії з АЕС та тепла
Рожевий/жовтий	Електроенергії з АЕС через електроліз води / електроенергії будь-якого походження через електроліз води
Червоний	Теплової ядерної енергії
Білий	Водень природного походження

Але для широкого розповсюдження зелених водневих технологій існують перешкоди:

- ціна та ємність електролізерів;
- низька ефективність технологій;
- доступність енергії з відновлюваних джерел;
- зберігання та транспортування водню;
- потреба у великій кількості очищеної води.

Першочергові сектори на озеленення воднем.

Транспорт.

Аби зберегти інфраструктуру, вплив і прибутки, транспортним компаніям важливий перехід на водень. Але не дивлячись на це, кілька великих європейських автовиробників відмовились від переходу на водневий легковий транспорт на користь електромобілів. Для них вважається це найбільш енергоефективним та економічно доцільним рішенням. Та пропри все експерти зазначають, що водень може зайняти важливу позицію для транспорту.

Промисловість.

Металургійна промисловість продукує приблизно 5% глобальних викидів CO₂. Великий потенціал у зменшенні споживання енергії та викидах парникових газів мають завдяки низьковуглецевим технологіям, повторному використанні ресурсів та енергоефективним заходам. І саме зелений водень є альтернативою вугіллю в металургії і використанню у виробництві природного газу.

Така галузь, як цементна промисловість, важко декарбонізується, але за рахунок спалювання водню можна досягти високої температури для виробництва цементу.

Будівлі – для багатьох експертів таке питання, як використання водню для опалювання будинків, є суперечливим. Головною проблемою визначають низьку

ефективність водневих технологій. Замінити природний газ воднем буде найпростішим завданням, аніж електричне опалення буде в тренді.

Енергетика. В електроенергетиці говорять про застосування водню для зберігання енергії та балансування системи. Зелений водень можна використовувати для балансування електричної мережі та у якості сезонного акумулятора енергії. Водень може забезпечити короткочасну гнучкість мережі, оскільки електролізери можуть реагувати на надлишки електроенергії з відновлюваних джерел. Найбільш доцільним вбачається використання зеленого водню, виробленого з надлишкової електроенергії з відновлюваних джерел [7].

У водневій стратегії ЄС Україні приділена особлива увага, тому що наша держава є пріоритетним партнером у цій галузі та буде заохочуватися участь країни в Європейському альянсі за чистий водень.

Деяким країнам світу потрібно буде багато водню і саме тому вони розглядають нашу країну як країну-експортера в рамках двостороннього партнерства.

Декарбонізація світової економіки задля утримання глобального потепління на рівні 1,5°C передбачає повну відмову від використання викопних палив. Лише зелений водень може розглядатись як потенційне рішення для деяких секторів.

Газифікація коксівного вугілля при високій температурі відома багатьом, але рідко використовується із-за неекологічності цієї технології.

Найперспективнішою є третя технологія, яка базується на отриманні водню шляхом електролізу.

Електроліз води в даний час розглядається як ідеальна технологія для отримання стійкого водню, це передбачає використання постійної електроенергії. Найбільш відомим варіантом є метод лужного електролізу і електроліз з протонообмінною мембраною. Обидва методи працюють при низьких температурах (60-70°C) [4].

Електроліз води.

Водень може вироблятися електролізом за високого тиску або електролізом води за низького тиску. У сучасних ринкових умовах 50 кВт·год електроенергії, витраченої на виробництво одного кілограма стисненого водню, коштують приблизно стільки ж, скільки водень, вироблений за 8 центів/кВт [4]. Ціновий еквівалент пояснюється тим, виробництво більшої кількості водню видобувається з викопних видів палива, тому що їх ефективніше використовувати для вироблення хімічного продукту. Головне завдання водневої енергетики полягає в отриманні водню з інших джерел.

Водень з біомаси

Біомаса теж перетворюється за допомогою газифікації. Це залежить від типу біомаси і виду його застосування. При технології вловлювання і зберіганні вуглецю викиди можуть бути нижчі, ніж для чорного чи бурого водню.

Сірий є найпоширенішим і в наш час більшість водню походить з природного газу, де він зв'язаний з вуглецем і може бути відокремлений за допомогою процесу парового реформінгу. Але при цьому надлишок вуглецю утворює CO₂. Сірий водень буває тоді, коли надлишок CO₂ не вловлюють. Сьогодні він становить більшу частину продукції і дає близько 9,3 кг CO₂ на кг отриманого водню.

Водень вважають синім, якщо викиди, що утворюються в процесі парового реформінгу, вловлюють і зберігають під землею за допомогою промислового вловлювання і зберігання вуглецю (CCS), щоб запобігти його поширенню в атмосфері. Саме тому блакитний водень часто вважають вуглець-нейтральним джерелом енергії, хоча точніше була б називати його низьковуглецевим, оскільки приблизно 10-20% утвореного CO₂ не можна вловити [11, 12].

Бірюзовим є твердий вуглець як побічний продукт. На сьогодні експериментальний спосіб добування водню з природного газу набирає обертів. Газ розкладається при дуже високій температурі з утворенням водню, а також твердого вуглецю. Такий водень має назву туркузевий або низьковуглецевий.

Водень, який отримано в процесі електролізу, має гаму з трьох кольорів: жовтий, рожевий і зелений. Саме в такому випадку викиди повного циклу продукування водню залежать від способу виробництва.

Рожевий виробляється з атомної енергії. Цей колір часто використовують для водню, який був отриманий в результаті електролізу.

Жовтий іноді вказує на водень, що продукований електролізом, де використовується сонячна енергія.

Зелений з поновлюваних джерел. Він не менш важливий, його ще часто називають чистим. Цей водень продукують з використанням електроенергії, яка видобувається з поновлюваних джерел, зараз він складає близько 1% від загального його виробництва. Європейська комісія розробила цілісну стратегію підтримки водню, помістивши її в центр Зеленої угоди ЄС.

Для стійкого виробництва водню, окрім електролізу, існує ще 11 варіантів, проте 5 з яких мають особливе значення:

- 1) Піроліз і газифікація біомаси;
- 2) Ферментація потоків біомаси в біогаз у поєднанні з біогазовим перетворенням;
- 3) Термохімічне розщеплення води;
- 4) Фотокаталіз (з використанням фотоелектрохімічних комірок (PECs));
- 5) Надкритична газифікація води біомасою.

Біомаса є джерелом енергії для трьох способів, коли водень виробляється частково як з води, так і з біомаси. Дискусії щодо наявності біомаси та її альтернативних видів, є сумнівними, з причини того, що довгостроковою метою має бути використання біомаси тільки для виробництва водню. Більша потреба є в іншому, а саме використання біомаси через синтез-газ, що також використовує вуглець для стійких хімічних продуктів, матеріалів біопалива, судноплавства або палива для авіації. Ще два варіанти використовують сонячну енергію, при цьому водень виробляється повністю з води. За допомогою концентрованої сонячної енергії термохімічні шляхи потребують високотемпературного нагрівання. Альтернативою в цьому випадку може біти використання тепла з ядерних реакторів.

Висновки.

1. Європейська Комісія розробила три стратегічні документи, які спрямовані на суттєве підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, боро-

тību с глобальним потеплінням, скорочення забруднення навколишнього середовища, що охоплює всі сектори економіки – енергетику, промисловість, транспорт, сільське господарство та будівництво.

2. Перехід до водневої енергетики, яка є екологічно чистою - це перспективний стратегічний вибір України, який визначить головні тренди та напрямки розвитку національної економіки протягом наступних 30 років. Енергетична стратегія України передбачає збільшення частки зеленої енергії до 2035 року майже на 25% та зменшення викидів CO₂ на 40% до 2030 року.

3. Україна має унікальний потенціал у сфері зеленої енергетики, що в свій час дозволить розвивати виробництво екологічно чистого водню, а розвинута мережа магістральних газопроводів дозволяє транспортування водню у вигляді домішки до 10%.

Перелік посилань

1. *The European Green Course and important aspects of the implementation of "hydrogen" projects.* (2021). European Business Association <https://eba.com.ua/a-european-green-deal-and-important-aspects-of-hydrogen-projects-implementation/>
2. *Forecasted volumes of electricity production for 2021* (2021). Ministry of Energy of Ukraine http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245487451
3. *Energy strategy of Ukraine.* (2021). Ministry of Energy of Ukraine <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article>
4. *New electrolysis method produces 4 times more hydrogen* (2018). <https://ecotechnica.com.ua/technology/3007-novyj-metod-elektroliza-proizvodit-v-4-raza-bolshe-vodoroda.html>
5. *Alternative energy sources* (2019). <https://soncedim.com.ua/blog/alternativni-dzherela-energiyi>
7. Bila, S. O., Shvaiuk, Y. E., & Bilyk, V. V. (2016). Energy sector role in competitiveness growth of the national economy: international experience and Ukrainian reality. *Ukraine*, 10 (1), 30-34
6. *Hydrogen energy in Ukraine* (2021). Ukrinform <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3315760-vodneva-energetika-v-ukraini-lise-na-rivni-rozmov-a-ci-realno.html>
8. *Energy of steel: report from the Interpipe plant.* (2019). Expro Consulting <https://expro.com.ua/statti/energya-stal-reportaj-z-zavodu-interpipe->
9. Dubovych, I.A., & Bulgakova, M.G. (2016). Theoretical methodological and practical ecological economic and legal principles of solving global climate change problems, *Ukraine*, 8(1). 67-70
10. Solovey, O. I., Leha, Yu. H., Rozen, V. P., Sytnyk, O. O., Chernyavs'kyi, A. V., & Kurbaka, H. V. (2007). *Netradytsiyni ta ponovlyuvani dzherela enerhiyi [Non-traditional and renewable energy sources]*. ChDTU Publ.
11. *Climate-neutral hydrogen from natural gas. Started a project on environmentally friendly industrial pyrolysis of methane* (2019). <https://gisprofi.com/gd/documents/klimaticheski-nejtralnyj-vodorod-iz-prirodnogo-gaza-nachat-proekt-po.html>
12. *Energy balance of Ukraine for 2020.* (2020). State Statistics of Ukraine <http://www.ukrstat.gov.ua/express/expr2021/11/147.pdf>

ABSTRACT

Purpose. Analysis of problems and prospects for the development of methods of hydrogen extraction, review of literature and study of methods of its transportation and use of hydrogen fuel in Ukraine and the world.

Methodology. To achieve the goal, the work uses an empirical method of scientific research, taking into account theoretical provisions.

Findings. Expanded and systematized methods of obtaining hydrogen using various technologies (such as extraction of green hydrogen from excess electricity from renewable sources, gasification of coking coal at high temperature, electrolysis), which allowed to create a laboratory installation, the starting material of which is distillate from mine water, for obtaining hydrogen by electrolysis.

Originality. consists in the analysis and systematization of energy and environmental aspects of the use of hydrogen fuel based on general information about hydrogen energy in Ukraine and the world. The regularities of the impact of various methods of obtaining hydrogen on the environment have been established. Although hydrogen is considered ecologically clean, in the future it is necessary to consider such a problem as the strengthening of the global greenhouse effect as a result of anthropogenic activity during the mass production and use of hydrogen and the impact of this activity on the protection of the Earth's ozone layer.

Practical implication. The expediency of the transition to hydrogen energy with the production of green hydrogen by electrolysis has been confirmed. Ukraine has a high potential in the field of production of ecologically clean green hydrogen using innovative technologies. The advantage of molecular hydrogen as a synthetic fuel is its high energy density, where hydrogen exceeds natural gas by 2.6 times, oil by 3.3 times, and cellulose by 8.3 times. The topical issue of the use of wind, solar and other types of energy has led to an increase in the share of alternative sources since 2007. By 2020 According to the Ministry of Energy and international partners, the potential of production and use of "green hydrogen" is a universal tool for decarbonization. The European Commission has developed a holistic strategy to support hydrogen, placing it at the heart of the EU Green Deal. Hydrogen is produced using electricity produced from renewable sources, which currently accounts for about 1% of its total production.

Keywords: *hydrogen extraction, decarbonization, energy, renewable energy sources, electrolysis.*